

## 貫流型風力タービンの出力・空力特性に関する実験的研究

その他（別言語等） のタイトル	Experimental Study on Aerodynamic Characters of Cross Flow Type of Wind Turbine
著者	岸浪 紘機, 今 紀衛, 大野 祥嗣, 鈴木 淳, 竹 内 徹, 菊地 悠樹
雑誌名	寒地技術論文・報告集
巻	19
ページ	684-691
発行年	2003
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1615">http://hdl.handle.net/10258/1615</a>

## 貫流型風力タービンの出力・空力特性に関する実験的研究

その他（別言語等） のタイトル	Experimental Study on Aerodynamic Characters of Cross Flow Type of Wind Turbine
著者	岸浪 紘機, 今 紀衛, 大野 祥嗣, 鈴木 淳, 竹 内 徹, 菊地 悠樹
雑誌名	寒地技術論文・報告集
巻	19
ページ	684-691
発行年	2003
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1615">http://hdl.handle.net/10258/1615</a>

2003年11月5, 6, 7日

CTC03-II-051

## 貫流型風力タービンの出力・空力特性に関する実験的研究

岸 浪 紘 機 (室蘭工業大学機械システム工学科)  
 今 紀 衛 (今組株)  
 大 野 祥 嗣 (ク)  
 鈴 木 淳 (室蘭工業大学 機械システム工学科)  
 竹 内 徹 (SMEX株)  
 菊 地 悠 樹 (ク)

## Experimental Study on Aerodynamic Characters of Cross Flow Type of Wind Turbine

K. Kishinami (Muroran Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering)  
 N. Kon (Kon-Gumi L.T.D.)  
 S. Ono (ク)  
 J. Suzuki (Muroran Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering)  
 T. Takeuchi (SMEX L.T.D.)

## 1. 緒論

自然エネルギーは環境に与えるインパクトが小さくかつ持続可能なものとして、未来の循環・共生社会体制において基軸となるエネルギー源の一つと考えられている。

中でも風力エネルギーは、三次元空間の大きな潜在力を有するものとして現在積極的に利用され始めている。その変換機の主流は翼型の特性を利用した高回転・高出力型のプロペラ型風力タービンであるが、規模に応じて諸種の方式が考えられ、その一つに風方向追従機構の不用な全方位性縦型貫流式風車<sup>(1)</sup>が在り、構造簡易にして安全で、外部案内羽根の設置による出力向上効果等の利点<sup>(2),(3)</sup>が期待される。一般論として、プロペラ型風車は大型・高性能出力機に展開し、貫流型風車は低速回転・強トルク型としての特性を生かした中・小型機向きと考えられているが、動翼の最適形状など不明の点が多い<sup>(4),(5)</sup>。

これまで外案内羽根付き縦型貫流式多翼風車の実験・研究を行ってきたが、本論では特に動翼の最適化に注目して平板翼と曲板翼の2組を用意し、その枚数とその最適寸法について解析的な検討を加

え、定常風速条件での実験から空力特性を解明して、関与する因子の出力性能に及ぼす影響を検討・考察した結果を報告する。

## 2. 実験装置および測定方法

本実験で使用する縦型貫流式多翼風車の物理モデルと作動媒体空気の流れ線分布をFig.1に示す。本研究での貫流式風車は外案内羽根部と羽根車部(動翼)の2要素で構成されている。

本貫流式風車の作動因子は、案内羽根の枚数を  $Z_g$ 、その長さ  $L_g$ 、取り付け角

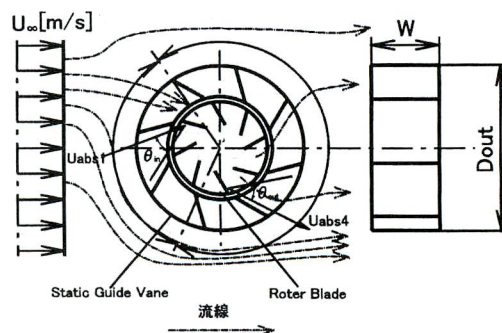


Fig.1 Physical Model of Cross Flow type Wind Turbine

岸浪 紘機 室蘭工業大学工学部 (室蘭市水元町 27-1、Tel.0143-46-5302,Fax.0143-46-5314)

今 紀衛 株式会社 今組 (室蘭市港北町 2-4-12、Tel.0143-55-7136,Fax.0143-55-4113)

$\theta_g$ , 動翼ブレードの枚数  $Z_b$ , その長さを  $L_b$ , 取り付け角  $\theta_b$  の 6 個であり、入口段と出口段の 2 段落タービン機と考えることも出来る。図中には、実験時風速の流線の状況を鎖線で示すが、一部の条件を除いて空気流は入口段部では一箇所の案内羽根部から入り、出口段部では 2 箇所の案内羽根部から流出することが認められる。

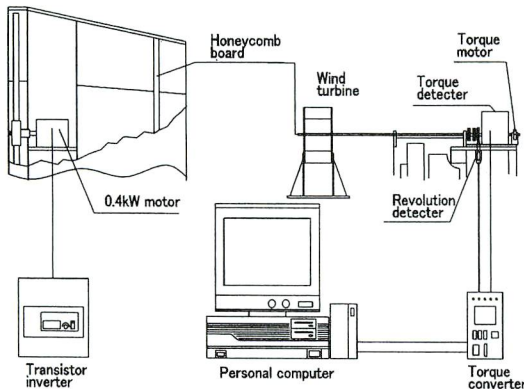


Fig.2 Experimental Apparatus and Measurement System

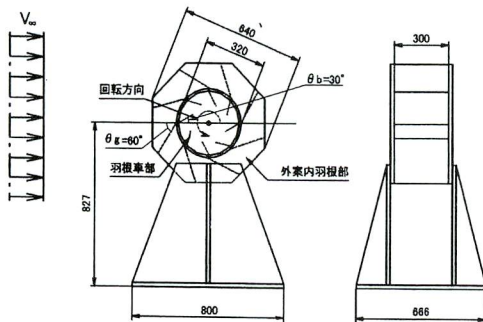


Fig.3 Experimental Model for Cross Flow Type of Wind Turbine

Fig.2 には本実験装置の全体図を示す。主要な装置である開放型風洞は 400W 三相交流モータで駆動される径 1.2m  $\phi$  の二枚翼プロペラと 4mm  $\phi$  コアのハニカム整流板で構成され、モータ回転制御用インバータにより風速が調整される。また風

車受風面と送風部の距離は 800mm であり、風速 4.5m/s までの流れはタフト法により層流であり、受風面における風速はほぼ全域で一様である。風車回転軸に接続された測定部は、図示の如くトルク検出器・回転数検出器・擬似負荷をあたえるトルクモータから構成されている。トルク及び回転数データはトルクコンバータを介してアナログ/デジタル変換され、パソコンに収納される。Fig.3 は本縦型貫流式多翼風車と風洞に対する配列位置の概要であり、外案内羽根部と羽根動翼部の径は夫々  $D_B=320\text{mm}$ 、 $D_G=640\text{mm}$  で、風車幅  $W=600\text{mm}$  である。これまでの研究で得られた最適取り付け角条件<sup>(3)</sup>として  $\theta_g=60^\circ$ 、 $\theta_b=30^\circ$ 、案内羽根枚数 8 枚に設定してある。Fig.4 には、回転ロータ一部の動翼に用いた曲板翼と平板翼を示す。平板動翼の場合は幅 50mm から 80mm までの大型動翼各 8 枚、幅 40mm から 50mm までの小型動翼角 8 枚、計 16 枚あるいは 8 枚の翼設置枚数としてある。曲率  $R=160\text{mm}$  の曲板動翼の場合は幅 40mm から 80mm までの大型翼 8 枚、幅 30mm から 80mm まで曲板小翼が各 8 枚とした。また、外案内羽根は平板翼を使用し、定常風速条件下の出力・トルク測定実験は、風速 5.0m/s・4.0m/s・3.0m/s のもとで行った。外案内羽根は枚数 8 枚、ロータ動翼部の枚数は 8 枚、16 枚の 2 パターンで設置して、トルクモータで擬似負荷を与え、ロータ一部の回転が止まるまでの各回転数におけるトルクを 0.1 秒ごとに 2 秒間ずつ測定・記録した。

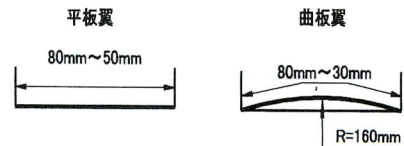


Fig.4 Blade Pattern used in Rotor

### 3. 実験結果の検討・考察

出力  $L[W]$  は出力係数  $C_p$ 、トルク  $Q[N\cdot m]$  はトルク係数  $C_q$ 、回転数  $N[\text{rpm}]$  は風



速  $V_{\infty}$  [m/s] に対する先端周速度の比  $\lambda$  として、以下の関係式で無次元化した。  $\rho$  は空気密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $D_B$  はローター羽根車の直径 [m]、 $W$  は羽根車の幅 [m] である。

$$C_q = \frac{Q}{0.25 \rho V_{\infty}^2 D_B^2 W} \quad \lambda = \frac{\pi D_B N}{60 V_{\infty}}$$

$$C_p = \frac{2L}{\rho D_B W V_{\infty}^3}$$

### 3. 1 動翼部が曲板翼の場合

出口段入口部で風速流量が1/2となる時の面積比率とベクトル水平成分

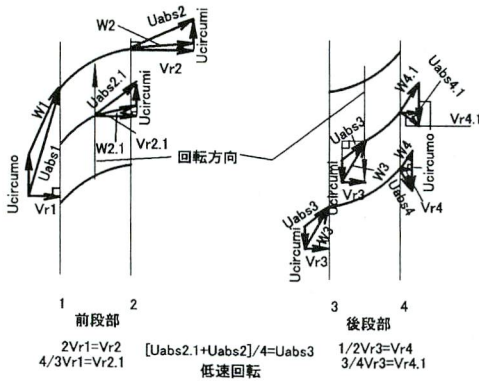


Fig.5 Velocity Vector for Curved Rotor Blade at In- and Outlet

本風車の特性を2段タービンとして径方向の通過面積と質量条件を考慮した速度ベクトルから検討してみる。Fig.5は、動翼が曲板翼の場合における本貫流型風車の入口・出口2段部の、速度ベクトル解析図である。図中の添字  $abs$  は絶対速度、 $W$  は相対速度を示し、 $U_{cir}$  は各位置の回転速度を表す。動翼は角速度  $\omega$  で回転するので動翼の外径、内径をそれぞれ  $r_o$ 、 $r_i$  とすると、 $U_{cir o} = r_o \times \omega$ 、 $U_{cir i} = r_i \times \omega$  で与えられる。図中は、曲板動翼8枚の間に小動翼8枚を入れた場合を表している。実験から前段部入口部は案内羽根の1セクションからのみ流入し、後段部の案内出口部では極低速回転の場合を除いて2セクションから流出する。この事実をもとに、後段部にこの質量保存則（後段部入口速度が前段部出口速度の半分となる）を適用した。即ち、図中の前段部に

おける動翼の出口速度は、後段入口部において、速度が半減することになる。低速回転時の前段部では、大翼はある程度エネルギー吸収し、小翼は相当のエネルギー吸収をすることになる。しかし、出口案内部からの放出が2セクションとなる（流管拡大）後段部入口速度は半減とする連続条件のみを考慮した単純な仮定下において、出口段ではほとんどエネルギー吸収は認められない。また、高速回転時では前段部の曲板大動翼はかなりのエネルギーを吸収し、小動翼はさらなるエネルギー吸収をしている。その1/2に減速した後段入口部においては、高速回転の場合、全体としてエネルギー吸収は認められず出力にほとんど寄与しないことになる。結局、①風車出力の大部分は前段部に依存し、②小翼ほどエネルギーを吸収すること、更に③風速近くの回転周速度では殆んど出力しないこと、④エネルギー吸収が良くても内部流動抵抗が増加すれば動翼通過空気量が低減して出力が低下すること等が本解析から判明される。

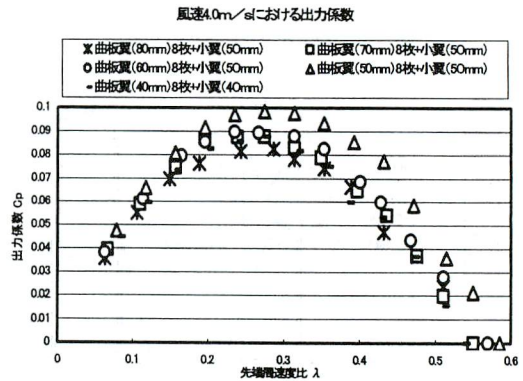


Fig.6 Power Coefficient  $C_p$  for 16 Pieces Curved Blade of Rotor

Fig.6は、風速4m/s下、各動翼間に小動翼を加えた16枚の組合せにおける出力特性図である。図より翼幅は動翼・小動翼共に50mmの組合せが最も高効率となり、40mmの場合は著しく性能が低下している。60mmと50mmの場合はそこそこの性能を示している。以上から、動翼枚数

16 枚の場合、翼幅は動翼，小動翼共に同じ幅の 50mm が高出力条件となる。

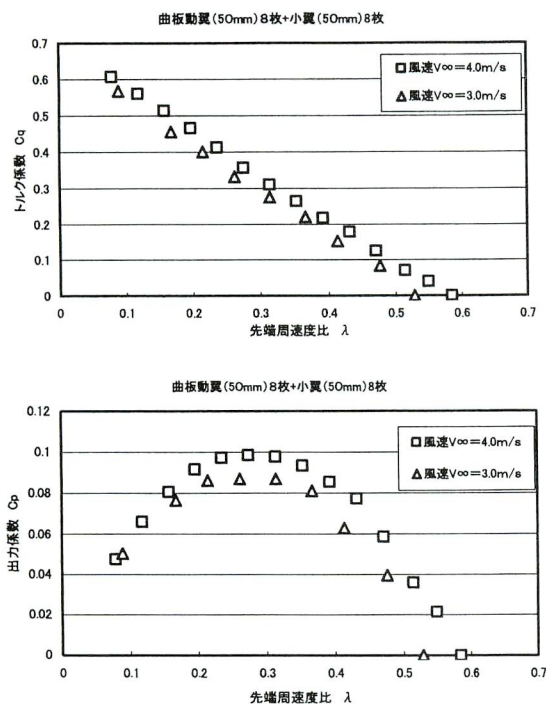


Fig.7 Output Characteristics depending on  $V_\infty$  for Curved Blade

Fig.7 は本条件で最高性能を示した幅 50mm の同一寸法の曲板動翼 16 枚、外案内羽根の設置角  $60^\circ$  の条件における，風速による出力係数  $C_p$  とトルク係数  $C_q$  の空力特性図を示す．図より，風速  $4.0 \text{ m/s}$  の場合のほうが，出力係数 ( $C_p$ ) ・トルク係数 ( $C_q$ ) 共に風速  $3.0 \text{ m/s}$  の場合より若干高性能となり，先端周速度比 0.3 前後で最高出力となっている．縦型貫流式多翼風車は高速回転になれば（風速と動翼回転速度が同等），各段動翼でエネルギー吸収が出来ず出力が低下する．図示の如く、トルク特性はいずれの場合も低速回転になる程トルクが増大し，典型的な低速回転強トルク型風車であることを示している．

### 3. 2 動翼部が平板動翼の場合

出口段入口部で風速流量が  $1/2$  となる時の面積比率とベクトル水平成分

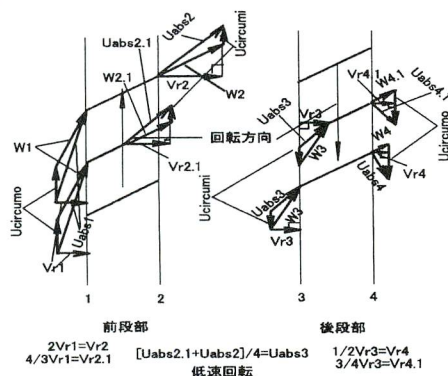


Fig.8 Velocity Vector for Flat Rotor Blade at In-and Outlet

Fig 8 は，動翼が平板翼賭した場合の本貫流型風車の入口・出口 2 段階の，前と同様の処理をした速度ベクトル解析図を示している．前図と同様に連続条件と外・内径の面積比率を考慮した単純な仮定の下での結果である．

平板翼は曲面翼の場合に比べて動翼部のエネルギー吸収が劣るが、平板動翼の内部流動抵抗が減少する結果、作動媒体の通過流量が増加してトータルとして出力性能はさほど変わらず、先の場合と同様の推論が導かれる．実際、強い曲面翼での実験結果は内部流動抵抗増により線図上の効率が良くとも逆に出力性能がかなり低下する．

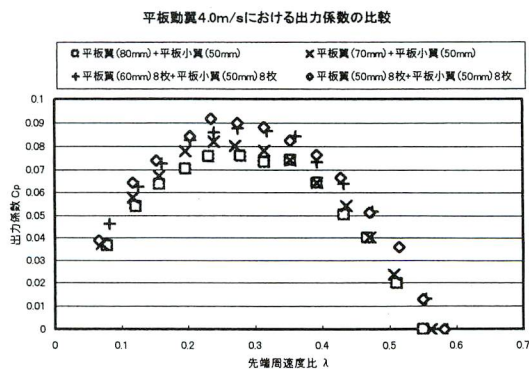


Fig.9 Power Coefficient for 16 peaces Flat Blade of Rotor



動翼ブレード部を平板翼とした目的の一つは、若干の性能低下が避けられないとしても製作上の簡易化、低価格化など実用上の利点を重視したことに由来するものである。

Fig.9 は、平板動翼の各翼間に小翼を加えた 16 枚組合せの場合の出力特性図である。図の結果から、短い翼幅は効率がよく、翼幅が大きくなれば出力効率が低下している。16 枚動翼数条件では、曲板翼の場合と同様に 50mm 動翼は最も効率が高くなるが、80mm 動翼では著しく低下する結果が得られた。平板翼でも、曲板翼と同様に大動翼 50mm・小動翼 50mm の組合せが最も良い効率を示すことが確認された。

Fig.10 は、本実験で最高性能を示した曲板翼、平板翼共に 50mm 翼幅の場合の風速 4.0m/s の下での出力・トルク特性を示すものである。先の図と併せ、いずれの場合も先端周速度比  $\lambda$  が 0.25~0.3 前後で最大出力となっている。また、 $\lambda = 0.25$  において曲板翼と平板翼の出力係数  $C_p$  は、0.01 差、約 10% の差が見られ、曲板翼と平板翼を比較すると曲板翼が高性能である。図中には 80mm の 8 枚動翼の場合を添えるが、16 枚の場合に比べて 20%~30% ほど出力・トルク共に低下している。本実験では曲板動翼、平板動翼の場合共に大動翼、小動翼共に 50mm の組合せが最高性能を示す事から、 $Z=16$  では風車部の半径 160mm に対し翼幅 50mm なので、半径比率の 1/3.2 倍前後あたりの無次元翼幅に最適値があると考えられる。

### 3.3 平板・曲板動翼部が 8 枚の場合

Fig.11 は、風速は 4.0m/s の下で 8 枚動翼の場合の平板・曲板動翼に対する空力特性の実測結果を示している。動翼枚数 8 枚の条件では、翼幅の長い方が高効率と

なり性能を上げ、逆に翼幅が短いほど劣性能となる傾向にあり、80mm の場合が最も高性能である。平板翼・曲板動翼共に 80mm 同士の比較では最高出力近傍の広回転域でトルク・出力共に曲板動翼の方が良く、高回転域では内部流動性が向上する分平板動翼が優れている。最高効率

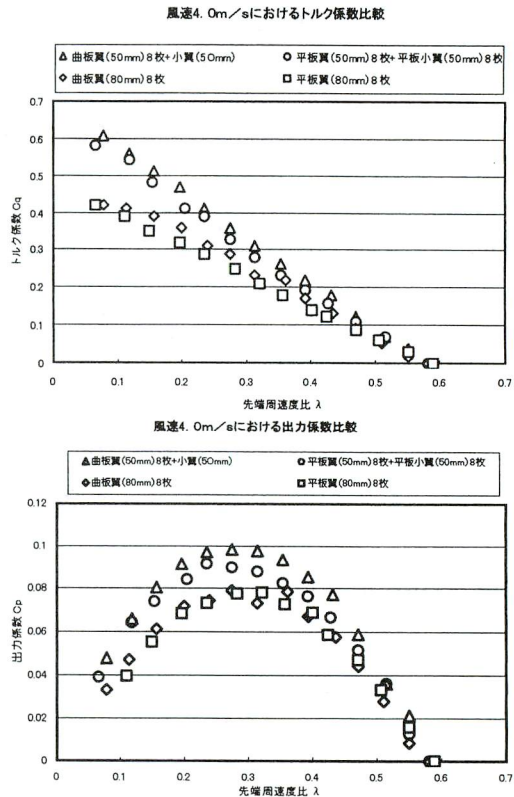
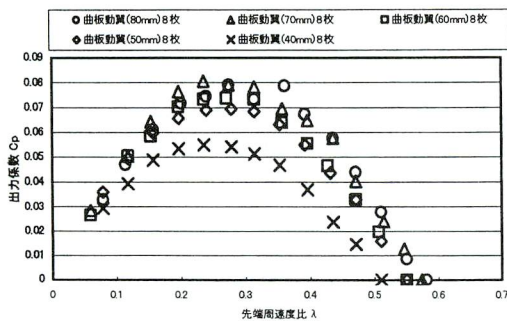
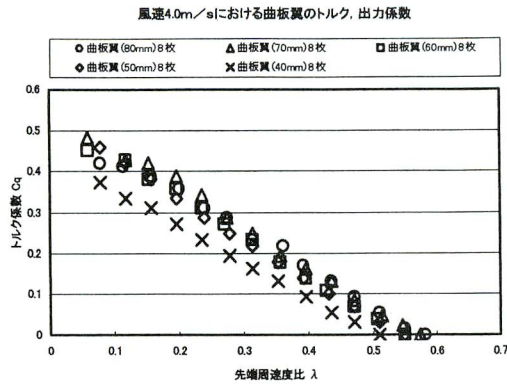


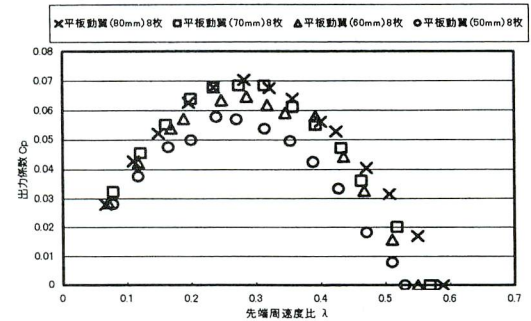
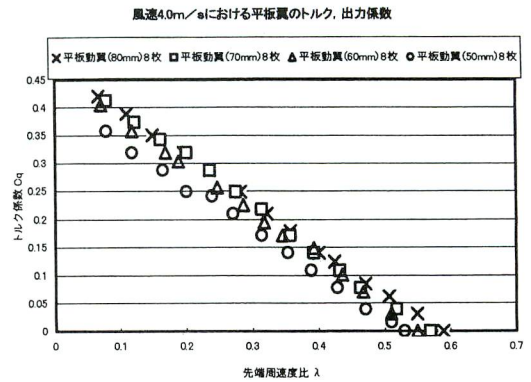
Fig.10 Output Characteristics for Curved and Flat Rotor Blade

(曲板動翼 80mm) と最悪の効率 (曲板動翼 40mm) の比較では 50% の差があり、翼枚数と翼幅間には重要な関係がある。また、動翼 16 枚 50mm と動翼 8 枚 80mm の場合の最適条件での出力効率  $C_p$  は 0.1 から 0.08 に、20% ほど性能低下している。

## 第19回寒地技術シンポジウム (2003)



(a) Curved Blade



(b) Flat Blade

Fig.11 Output Characteristics

for 8 Peaces Rotor Blade

### 4. 高風速条件での実験結果、 および検討・考察

これまでの結果は全て 400Watt 開放型風洞の制約上風速 5m/s までの実験結果であり、更なる風速域での本風車の特性の解明が待たれていた。この度、三相交流インバータ制御 3700W の風速機を拝借できたので、風速 12m/s までの高風速域における本風車の出力特性の実験結果を報告する。これまでの標準型（ローター径 320mm、ローター幅 300mm）に加えて、幅を 600mm にした幅拡大型とローター径を 500mm  $\Phi$  幅 300mm の径拡大型について模型風車を製作して実験的に解明した結果を合わせて報告する。この実験で使用した風車は全て案内羽根外径部を風方向に局所的に R を付けた今式風力トラップ（特許申請中）を設置した型式であり、本論での案内羽根の場合の比べて若干性能が向上する。

### 標準型 ( $R_B=320\text{mm}$ , $W=300\text{mm}$ )、 幅拡大型 ( $R_B=320\text{mm}$ , $W=600\text{mm}$ )、 径拡大型 ( $R_B=500\text{mm}$ , $W=300\text{mm}$ ) の 出力・トルク特性

Fig.12(A)は従来の標準型本貫流式風車の風速 6, 8, 10, 12m/s における出力とトルク特性を示す。風速 10m/s では 240 rpm 前後で最大出力 7.8Watt ほどである。ローター受風面積  $R_B \cdot W = 0.096 \text{ m}^2$  であり、風速 10m/s における風力エネルギーは 600Watt/m<sup>2</sup> より本風車の  $C_p$  は約 13.4%、今式風力トラップは 10%性能向上をすることが判明しているので、妥当な数値である。風速 8m/s、6m/s での最大出力は 4Watt、1.8Watt であり速度比の 3 乗則が成立しており、最大回転数は風速比に依存していること等がわかる。これらの結果より、本風車は同一受風面積のプロペラ型風車 ( $C_p=40\%$ ) に比べ出力性能は 1/3 程度に低下、しかし、全ての結果が示す



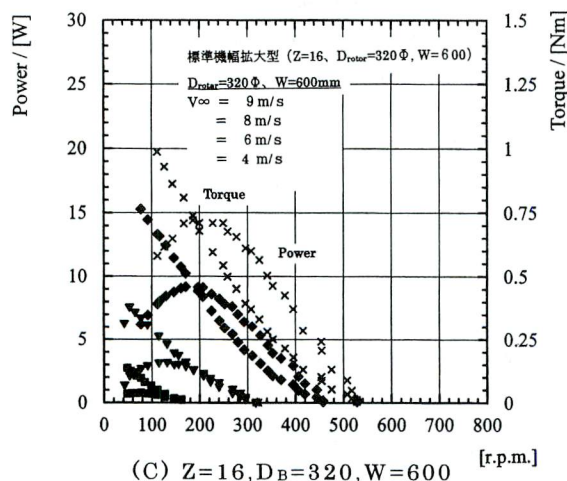
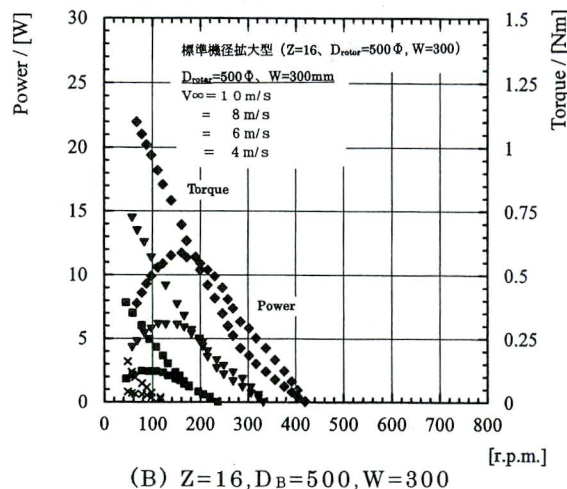
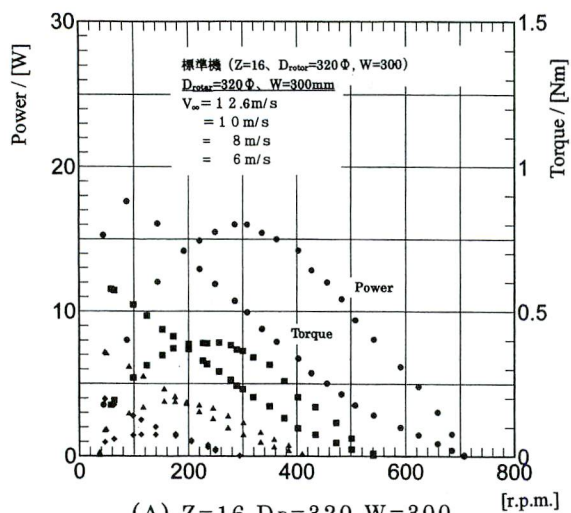


Fig.12 Output Characteristics for Different Size of Rotor at High Velocity

ように起動回転時のトルクが極めて大きく、自力起動の長所は風方向追従機構が不要なることと併せて本風車の欠点を補って余りあるものがある様に思える。

図中には径拡大型 ( $R_B=500\text{mm}$ ,  $W=300\text{mm}$ ) と幅拡大型 ( $R_B=320\text{mm}$ ,  $W=600\text{mm}$ ) の実験結果を Fig.12(B),(C) で示すが、風速  $10\text{m/s}$  における径拡大型の出力は  $12\text{Watt}$  であり、出力は標準型を基準としたローター径の比に比例し、最大回転数は逆比例する傾向にある。従って、本風車の径を拡大すればそれに比例した出力向上を得ることが出来るが、回転領域が狭まり、最大出力の回転域から少し外れると出力が激落する使いにくい風車となる。一方、幅を2倍に拡大した場合を図(C) (この実験条件はかなり無理をした結果、参考値) で与えるが、ほぼローター幅に比例した出力増の結果となっている。この結果より本型式の風車はローター径を小さく適正にし、ローター幅を大きくした幅拡大型として広回転域で出力特性に柔軟性を与える型式が望ましく思われる。

## 5. 結論

近未来における化石エネルギー源の枯渇の予測は、今日の潤沢なるエネルギー使用の時代は束の間のこととする認識を人々に与え、再生エネルギーに主点を置くエネルギー革命の到来を予測させている。中でも風力エネルギーは、三次元空間の大きな潜在力を有するものとして翼型の特性を利用した高回転・高出力型の大型プロペラ型風力タービンが開発され、将来的には地球的な電力需要の半分以上を賄える未来エネルギーと見為されている。

本研究は、小規模向きに適正があるとされる全方位性縦型貫流式風車について、特に動翼の最適化について実験的研究を行ったものである。

本研究より以下の結論が得られた。

1. 本実験での動翼枚数16枚の条件で最適効率率は翼幅平板翼、曲板翼ともに動翼  $50\text{mm}$ ・小翼  $50\text{mm}$  の16枚で

の組合せと、また 8 枚の条件では動翼幅 80mm となる。従って、風車部の半径 160mm に対し 50、80mm などで無次元比率は夫々 1/3.2、1/2 前後あたりに最適値があると推測される。

2. ローター動翼の枚数は 16 枚の方が、低回転域で著しく性能が向上し、最大効率で動翼 8 枚の場合より 20%ほど高い効率を示した。
3. 小動翼を挿入した場合、動翼が小さくなるのに比例して効率が增加する。しかし、小動翼を除いた 8 枚の場合は逆に動翼が大きくなるほど、効率も増加する。また、動翼、小動翼共に翼幅を同一にして規則正しく配列した場合の方が高性能となり、平板翼、曲板翼共に同様の結果が得られた。
4. 風車は同一受風面積のプロペラ型風車に比べて出力性能は 1/3 程の能力となるが、低回転時のトルクは大きく、特に起動性は著しく向上する。
5. 本風車の寸法効果として径を拡大すれば拡大した分出力は向上する(但し、 $C_p$  は同一)が、作動回転領域は狭まり使いにくい風車となる。一方、ローター幅を拡大すれば拡大した分出力増加となり、しかも回転領域は変わらない。
6. 案内羽根部の縮小部は基礎実験に依れば増速装置として作動していない。この部で 20%の増速が達成されれば 70%の出力増加となる。標準型の場合、案内羽根を外した計測では 30%ほど出力が低減することより<sup>(8)</sup>、案内羽根は風力の方向制御に作動している。

#### 参考文献

- (1) 赤羽正彦, “貫流風車の性能におよぼすガイドペーンの影響について”, 第 13 回風力エネルギー利用シンポジウム, (1988), P131-134
- (2) 岸浪紘機, 他 8 名, “貫流型風力タービンの空力特性に関する実験的研究”, 日本機械学会第 12 回環境工学総合シンポジウム講演論文, (2002), p.509-512.
- (3) 山田亜弥, 他 6 名, “外案内羽根付クロスフロー型風力タービンの空力特性に関する実験的研究”, 日本機械学会流体力学部門講演会講演概要集, (2000), p.264.
- (4) Fujisawa N. and Goto F., "Experimental Study on the Aerodynamic Performance of a Savonius Rotor", ASME J. of Solar Energy Engineering, Vol.116, 1994, pp-148-152.
- (5) Ushiyama Y., Isshiki N., and Chai G., "Design Configuration and Performance Evaluation of Cross Flow Wind Rotor", Solar Energy, Vol.20, No.4, 1994, pp.36-41.